

자기 누설 비파괴 탐상 시스템에서 PIG의 이동이 검출신호에 미치는 영향

박상호, 박관수
한국해양대학교 전기전자공학부

Effect of the PIG Moving on the Defect Signals in MFL NDT System

Sang Ho Park and Gwan Soo Park
Dept. Electrical Engineering, Korea Maritime University

Abstract - 배관의 PIG시스템은 비파괴검사로서 배관 내부에 삽입되어 내부 매체에 의하여 추진되는 장치로서 영구자석을 이용한 자기회로를 형성하여 결함이 있을 때 누설자속을 검출하여 이를 해석하여 배관내의 결함의 크기와 깊이를 검출할 수 있다. 그러나 실제 검출신호는 PIG가 이동시 이동속도에 따른 와전류 문제와 가스관의 착자에 따른 히스테리시스특성에 따른 신호들이 실제 결합에 의한 신호를 왜곡시키게 된다. 본 연구에서는 PIG의 이동에 따른 이동속도에 따른 와전류 문제와 히스테리시스특성이 검출신호를 왜곡하는 현상에 대하여 연구하였다.

자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨두어야 한다. 일반적으로 자화량 M' 은 외부의 자계가 제거되면 사라지는 가역항(reversible component : χH)과 외부의 자계가 제거되어도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비 가역항(irreversible component : M)의 합으로 나타낼수 있다.

$$M = \chi H + M \tag{5}$$

식 (5)를 식 (2)에 대입하면

$$H = \nu B - \nu_r M \tag{6}$$

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $\nu = 1/\mu$, $\mu = \mu_o \mu_r$, $\nu_r = 1/\mu_r$, $\mu_r = 1 + \chi$ 이다. 이것을 식 (1)에 대입 하면 식 (6)의 관계로부터

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J + \nu_r \nabla \times M \tag{7}$$

회전에 의한 벡터 관계식과 coulomb 게이지로부터 식 (8)과 같은 지배방정식을 얻는다.

$$-(\nabla \cdot \nu \nabla)A = J + \nu_r \nabla \times M \tag{8}$$

속도에 의해 발생하는 와전류의 전류밀도 J_v 로 나타내면

$$J_v = \sigma V \times B \tag{9}$$

로 나타낼 수 있고, 매질을 고려하면 B와 H는

$$B = \mu H \tag{10}$$

로 나타낼 수 있고, 식 (10)을 식 (3)에 대입하여 H에 대하여 풀면

$$H = \frac{1}{\mu} \nabla \times A \tag{11}$$

로 나타낼 수 있다. 식 (11)을 식 (1)에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \tag{12}$$

로 나타낼수 있다. 식 (12)를 영구자석에 의한 보자력 H_c 를 적용하면

1. 서 론

MFL PIG는 가스관의 부식 등으로 인한 결함을 비파괴로 검출하는 방법으로[1-6], 이 방법은 가스관을 요크와 영구자석을 이용하여 자기시스템으로 만들고 이 가스관을 적절히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설자속을 홀센서를 이용하여 검출한다. 비선형 3차원 유한요소법을 사용하여, 가스관의 결함이 있을 경우 결함의 크기, 깊이에 따른 결함 신호를 예측 가능하다. 그러나 실제 가스관을 통과한 신호는 가스관의 착자에 의한 영향과 속도에 의한 와전류에 의하여 왜곡이 발생하게 된다.

본 논문에서는 가스관의 착자에 의한 영향과 속도에 의한 와전류에 의한 영향을 해석하여 이를 보정하므로 실제 결합에 의한 신호 보정에 관하여 연구하였다.

2. 본 론

2.1 자기누설 탐상이론

2.1.1 지배방정식

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$B = \mu_o (H + M) \tag{2}$$

$$B = \nabla \times A \tag{3}$$

여기서 μ_o 는 진공에서의 투자율(permeability), A는 자기 벡터 포텐셜이다. 비선형 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화를 χ 로서

$$M = \chi H \tag{4}$$

와 같이 표현되지만 해석 영역내에 비선형 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자계의 세기나

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A - H_c \right) = J \quad (13)$$

로 나타낼수 있다. 식 (13)에 속도에 의한 와전류 J_v 를 적용하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A - H_c \right) = J - \sigma V \times \nabla \times A \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다.

2.1.2 유한요소 정식화

해석영역을 고정 경계조건과 자연경계조건으로 나누고 고정 경계에서 고정경계조건을 만족시키며 한번 미분 가능한 가중함수 W 를 식 (8)에 곱한후 전체 영역에서 적분하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\int_{\Omega} W (\nabla \cdot \nu \nabla) A + J + \nu_r \nabla \times M d\Omega = 0 \quad (15)$$

Green 정리와 경계조건으로부터

$$\int_{\Omega} \{ -\nu \nabla W \nabla \cdot A + W J - \nu_r \nabla W \times M \} d\Omega = 0 \quad (16)$$

를 얻는다. 해석영역을 유한개의 요소로 나누고 요소내의 자기 벡터 포텐셜을 구할수 있다.

MFL을 이용한 NDT시스템은 자기포화 곡선을 이용하는 비선형 문제이므로 오차가 일정값 이하로 될 때까지 식 (14)을 유한요소법으로 계속 반복 계산하여야 한다.

2.2 착자 및 와전류에 의한 NDT신호와 왜곡

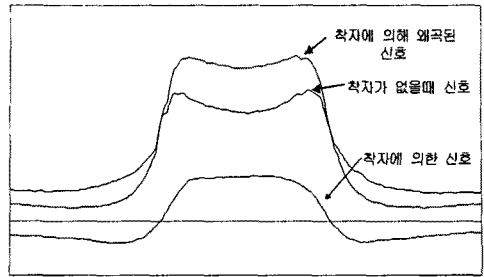
MFL PIG는 가스관의 부식등의 결함을 검출하는 방법의 일종으로 가스관을 요크와 영구자석을 구성하여 적절히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설 자속을 홀센서를 이용하여 검출한다. 결함의 길이가 증가하면 신호의 폭의 증가하고, 결함의 깊이가 깊어지면 신호의 크기가 증가한다. 이 결과를 신호 처리하여 이미지화 하면 결함의 모양과 깊이 정도를 나타낼 수 있다. 그러나 가스관의 착자와 MFL PIG의 주행속도에 따른 신호의 왜곡이 발생하게 된다.

2.2.1 착자에 의한 신호 파형 왜곡

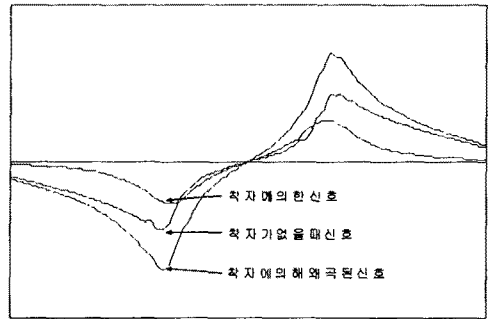
가스관의 착자는 종방향 착자와 횡방향 착자로 나눌수 있으며, 그림 1은 횡방향 착자에 대한 영향이며, 횡방향 착자에 의한 왜곡은 신호를 증가시키는 왜곡이 발생한다. 그림 2는 종방향 착자에 의한 영향이며, 종방향 착자에 의한 왜곡은 신호를 왜곡시키는 형태로 나타난다.

2.2.2 센서 주행속도에 의한 신호 파형 왜곡

센서 이동 속도 4m/s가 기준이며 실제 이동 속도는 0 - 10m/s이다. 이동 속도가 증가함에 따라 가스관의 속도 기전력에 의한 와전류가 발생하고 와전류에 의한 자기장이 측정 신호파형을 왜곡시킨다. 그림 3(a)는 정지시 MFL PIG의 Flux Line이며, 그림 3(b)는 MFL PIG가 4m/s로 이동시 Flux Line이다. 자기장이 왜곡됨을 알 수 있다. 그림 4(a)는 주행속도에 의한 Br신호를 나타내었다. 속도가 증가할 경우 저속 운행시 (1-2m/s)로 이동시는 최대값은 변하지 않고 파형의 왜곡이 발생하나 속도가 증가함에 따라 최대값도 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)는 주행속도에 의한 Bz신호를 나타내었다. 속도가 증가할 경우 파형이 왜곡됨을 알 수 있다. 실제 신호에서 주행 속도에 의한 와전류에 대한 왜곡을 보정하여야만 결함에 의한 신호를 검출할 수 있다.

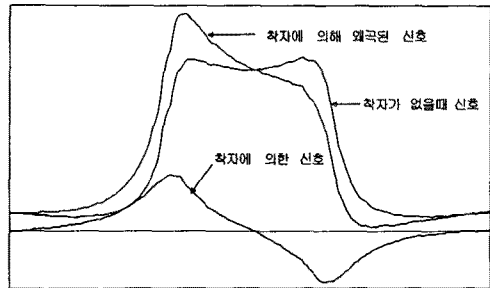


(a) 착자에 의한 Br 신호의 왜곡

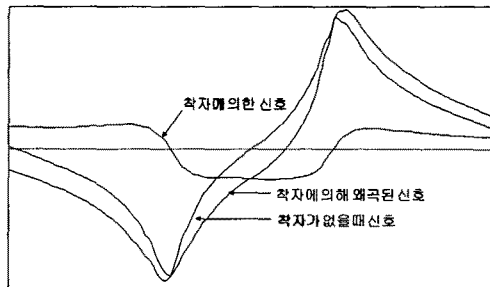


(b) 착자에 의한 Bz신호의 왜곡

그림 1. 횡방향 착자에 의한 신호 왜곡

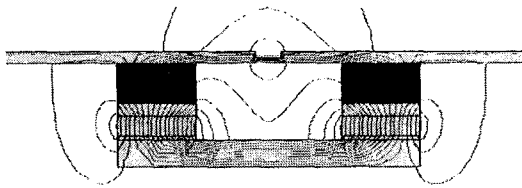


(a) 착자에 의한 Br신호의 왜곡

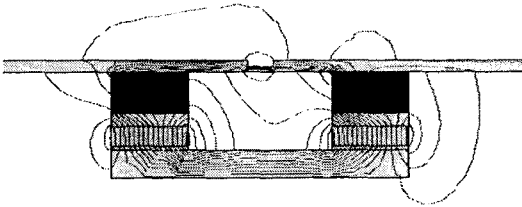


(b) 착자에 의한 Bz 신호의 왜곡

그림 2. 종방향 착자에 의한 신호 왜곡

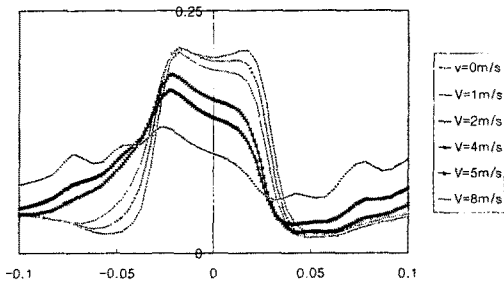


(a) 정지시 MFL PIG의 Flux Line

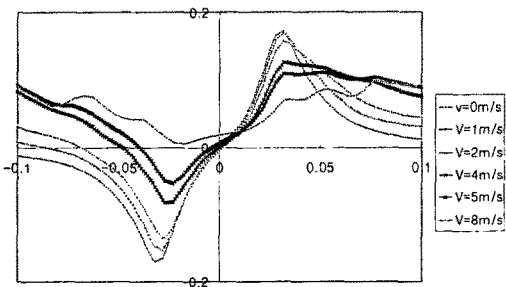


(b) 4 m/s로 이동시 MFL PIG의 Flux Line

그림 3. 정지시와 이동시의 MFL PIG의 Flux Line



(a) 속도에 따른 MFL PIG의 Br 신호



(b) 속도에 따른 MFL PIG의 Bz 신호

그림 4. 속도에 따른 MFL PIG의 신호 왜곡

3. 결 론

본 연구는 지하매설 가스관의 MFL 탐상 방법에 관하여 연구하였다. 비선형 3차원 유한요소법을 사용하여, 가스관의 결함이 있을 경우 결함의 크기, 깊이에 따른 결합 신호를 예측 가능하다. 그러나 실제 가스관을 통과한 신호는 가스관의 착자에 의한 영향과 속도에 의한 와전류에 의하여 왜곡이 발생하게 된다. 횡방향 착자에 의

한 영향은 신호를 증가 시키는 방향으로 작용하고, 종방향 착자의 경우는 신호를 왜곡시킨다. 실제 신호를 착자에 의한 왜곡을 보상하여 결합에 의한 신호를 검출할 수 있으며, 결합에 따른 크기와 깊이를 산출 할 수 있다. 센서 이동 속도 4m/s가 기준이며 실제 이동 속도는 0 - 10m/s이다. 이동 속도가 증가함에 따라 가스관의 속도 기전력에 의한 와전류가 발생하고 와전류에 의한 자기장이 측정 신호파형을 왜곡 시킨다. 실제 신호를 와전류에 의한 왜곡을 보상하여 결합에 의한 신호를 검출할 수 있으며, 이것의 크기와 폭등으로 결합의 깊이와 크기를 산출할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Jim Cordell, C. Eng. M. I. Mech. E, F. Inst. Pet and Hershel Vanzant, 1999, "In-line Inspection pigging", All about pigging, chapter 8, pp. 1-28.
- [2] H. Haines et al., "Advanced MFL signal analysis aids pipe corrosion detection", Pipeline & Gas Industry, pp. 49-63, March 1999.
- [3] K. K. Tandon, "MFL Tool Hardware for Pipeline Inspection", Materials Selection & Design, pp. 75-79, February 1997.
- [4] D. L. Atherton and M. G. Daly, "Finite Element Calculation of Magnetic Leakage Detector Signals", NDT International, vol. 20, no. 4, pp. 235-238, August 1987.
- [5] J. Bruce Nestleroth, Steven W. Rust, and David A. Burgoon, "Determining Corrosion Defect Geometry from Magnetic Flux Leakage PIG Data", The NACE International Annual Conference and Exposition CORROSION 96, Paper No. 44, pp. 1-11, 1996.
- [6] S. Mandayam, L. Udpa, S. S. Udpa and W. Lord, "Wavelet-based permeability compensation technique for characterizing magnetic flux leakage images" Data", NDT&E International, Vol. 30, No. 5, pp. 297-303, 1997.
- [7] Richard P. Lippmann, "An Introduction to Computing with Neural Nets", IEEE ASSP MAGAZINE, pp. 4-22, April 1987.
- [8] Park G. S., Chang P.W. and Kim Y.K., "Sensitive Detection of the Defect Signals in MFL Type NDT", Proceedings of the Ninth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, pp 181, Milwaukee, U.S.A., June 4-7 2000
- [9] Park G. S., Chang P.W. and Rho Y.W., "Optimum Design of the Non-Destructive Testing System to Maximize the Magnetic Flux Leakages", Journal of Magnetism, Vol.6, No.1, pp.31-35, March 2001